



Allegato a Galileo 230, Ottobre 2017

Santiago Calatrava Architetto, ingegnere o grande innovatore?

Un'analisi attraverso il ponte della Costituzione

**Antonello De Luca
Laura Giovanna Guidi**

Liber amicorum
per Enzo Siviero

Antonello De Luca
Laura Giovanna Guidi

Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
Università degli Studi di Napoli "Federico II"

*Enzo Siviero: all'amico dedico i miei recenti studi,
anche per una discussione "amichevolmente polemica"*

Prefazione

Impossibile sottacere il mio piacere nel partecipare a una pubblicazione che delinei il contributo di Enzo Siviero nel campo dell'ingegneria strutturale dei ponti.

Relatore, all'interno dell'Iuav, di oltre settecentocinquanta tesi di laurea, molte delle quali riguardanti il tema dei ponti, alcune accreditate da premi nazionali e internazionali, Siviero ha condotto negli anni un'approfondita ricerca sul tema, in ambito universitario come in campo professionale, dedicando gran parte della sua carriera accademica alla ricerca del punto di equilibrio tra struttura e forma, comportamento meccanico e caratteristiche estetiche. Nell'ottica del *conceptual design*, ha da sempre inteso i ponti, di là dal loro aspetto puramente strutturale, oggetti di architettura relazionati al circostante contesto, al fine di realizzare un più sostenibile e meno invasivo sviluppo delle infrastrutture. Autore e curatore di riviste, collane editoriali, di numerosi testi tecnico-scientifici, riguardanti tra l'altro il progetto di ponti e di grandi strutture, ricordo, di Siviero, l'abilità nel trasmettere il suo denso bagaglio culturale attraverso mostre,

quali *Enzo Siviero Il tema del ponte* (1999) e *Ponteggiando Bridging* (2009) entrambe di risonanza internazionale, mostre, tra l'altro, inerenti celebri figure del panorama dell'architettura strutturale, da Calatrava (Padova, Palazzo della Ragione, 1996) a Eugenio Miozzi (Venezia, Santa Marta, 1997), fino a Eduardo Torroja, ricordando, a tal proposito, l'incontro tenutosi a Napoli con Enzo e il nostro Maestro Elio Giangreco nel 2004, all'interno della mostra itinerante su Torroja. Il mio personale contributo nel *Liber Amicorum* dedicato a Enzo Siviero è, in tal caso, incentrato su Santiago Calatrava, progettista, tra i più celebri del nostro secolo, che forse più di chiunque altro personifica l'esito di quell'affannosa ricerca volta a delineare una figura professionale che condensi ingegneria e architettura. Progettista che ha da sempre reso nei suoi ponti la sintesi di un *iter* progettuale orientato verso forme e tecnologie innovative, Calatrava, a valle degli oltre settanta ponti progettati, si rivela un artista capace di sintetizzare circa cento anni di storia dell'ingegneria in opere dall'indubbia eccezionalità, riqualificanti il contesto;

strutture estremamente eleganti, dotate al contempo di propria identità e riconoscibilità. Lasciando un segno distintivo nell'evoluzione dei ponti a via inferiore, in particolar modo ad arco, in linea con i più grandi progettisti della storia, l'architetto valenziano ha palesato, negli anni, una tendenza a ottimizzare gli elementi strutturali, sia in termini materici che dimensionali: l'infittimento delle sospensioni, corrispondente a un incremento del numero di irrigidimenti trasversali, con conseguente riduzione delle dimensioni della travata longitudinale, uniti all'impiego di sezioni a cassone torsiorigide o di impalcati a piastra ortotropa, hanno condotto a soluzioni strutturali estremamente snelle, operanti, su grandi e piccole luci, in regime estensionale. Questo mio personale contributo, dedicato a Siviero, nel percorso di "analisi scientifica" di alcune opere di Calatrava, tratterà, in particolare, del ponte della Costituzione, realizzato nella città in cui ha insegnato Siviero, a Venezia, dopo poco meno di un secolo dall'ultimo intervento di Miozzi sul Canal Grande e a cinquecento anni di distanza dalla realizzazione del ponte di Rialto ovvero dal tentativo, senza successo, di Palladio, di formulare una sua proposta di risistemazione urbanistica.

Lo spirito amichevolmente polemico, che profonde l'intervento proposto, mi ha visto, talvolta, sulla sponda opposta rispetto a tanti altri ingegneri, avendo io scelto di assumere posizioni, diverse da quelle di molti colleghi, che palesino la mia ammirazione per l'opera dell'architetto valenziano, essendo convinto sostenitore scientifico della grandezza del suo operato. Ricordo, in merito, il dibattito avuto in occasione del Congresso CTA, alle Giornate Italiane della Costruzione in Acciaio, tenutosi a Salerno nell'ottobre 2015, quando mi sono sentito solitario difensore dell'ingegno di Calatrava, contrastato da quanti hanno ancora difficoltà nell'accettare schemi strutturali meno convenzionali, ma certamente correttamente impostati. Contestato da molti per le soluzioni strutturali dai costi eccessivi, imputato di quel *too much*, del suo continuo tentativo di estremizzare gli usuali schemi statici con la conseguente necessità di realizzare strutture estremamente onerose, Calatrava, si rivela, a mio parere, essere uno dei più grandi maestri dell'ultimo secolo, in grado di condensare più di cento anni di storia in opere d'indubbia eccezionalità, per la quali snellezza, continuità nelle linee, flussi di forza ben leggibili propri di una costruzione che non mistifica, con le sue

forme, il funzionamento, divengono aspetti che fanno dell'efficienza strutturale la sintesi di tecnologia-costo-estetica.

Credo non si possa sottacere il suo grande contributo nell'evoluzione dei ponti a via inferiore, il suo continuo sperimentare forme e tecnologie innovative impiegate in ardite soluzioni, strutturali e architettoniche; né è possibile sorvolare sulla sua capacità nel realizzare strutture estremamente eleganti, in cui alla ricercatezza dei dettagli si associa la sua abilità nell'ottimizzare, soprattutto in termini dimensionali, gli elementi strutturali, riuscendo a realizzare opere dai densi valori edonici, che profondano di valore aggiunto l'ambiente circostante. Ma ciò che a mio avviso lo rende un grande innovatore, un protagonista del XXI secolo, è il suo apporto tecnico nella concezione ed evoluzione dei ponti a via inferiore: il suo contributo si pone in linea con le più recenti tendenze nell'ambito della progettazione strutturale, ove l'infittimento della pendinatura, il progressivo incremento del numero di sezioni trasversali, hanno consentito di raggiungere luci di mille metri, quasi annullando la struttura principale.

Propongo il mio intervento, soffermandomi su quell'opera che mi ha portato a condividere con Siviero una tra le mie più coinvolgenti esperienze professionali, quella che ha visto lui in qualità di collaudatore del ponte della Costituzione, me incaricato dall'ing. Salvatore Vento, già RUP nella realizzazione del Quarto Ponte sul Canal Grande, di redigere una consulenza tecnica, che attestasse la correttezza della progettazione e realizzazione dell'opera, ovvero l'adeguatezza della spesa affrontata nel realizzare un'opera di siffatta straordinarietà.

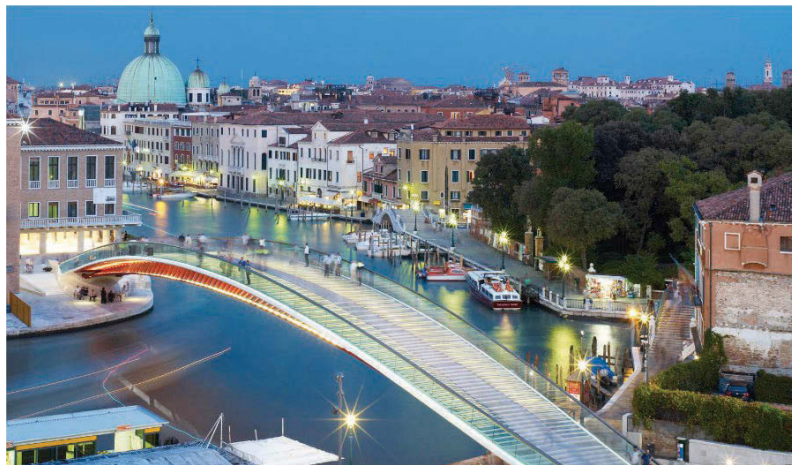
Denso della *concinnitas* albertiana, di un aulico virtuosismo formale, di quella ricercatezza nei materiali che ne fa un'opera d'arte, il ponte della Costituzione si presenta, a mio parere, una struttura eccezionale, perfettamente integrata nel contesto lagunare, un progetto realizzato dall'architetto valenziano con la consapevolezza di consegnare alla storia qualcosa destinato a durare a lungo, opera virtuosa, che segue quel *fil rouge* delineato da Palladio già col ponte di Rialto (che lui stesso non riuscì a realizzare!) nell'inserire l'opera in un più vasto intento di riordino della città.

Antonello De Luca

Calatrava e il quarto attraversamento sul Canal Grande

8

In linea con il suo *modus operandi*, leggibile in opere in grado di creare quel chiaro effetto di movimento arrestato, frutto di una continua ricerca di soluzioni tecnologiche che consentano di ottimizzare gli elementi strutturali, Calatrava propone, per il quarto attraversamento sul Canal Grande, una soluzione matericamente ibrida, un dinamismo *morfemico* che vede l'acciaio protagonista. Struttura che si inserisce, alla maniera palladiana, in un più vasto intento di riordino degli accessi alla città, il ponte della Costituzione evoca, già in fase progettuale, il tema della qualità delle opere infrastrutturali, quindi la necessità di apportare nel contesto segni architettonicamente forti, in grado di catalizzare l'attenzione e valorizzare tutto quanto sia intorno (figura 1 e copertina).



1. Santiago Calatrava, *Ponte della Costituzione*, Venezia 2001-07; L=80.80 m; f/L=1/4; ip/L=1.3%, ha/L=2,5%

Nonostante le innumerevoli critiche, forse imputabili a quel suo, da alcuni reputato, eccessivo tecnicismo, al compiacimento, spesso palesato da Calatrava, nell'indugiare in giochi che i prodigi della tecnica oggi consentono, malgrado pareri non sempre positivi legati, probabilmente, al suo apparire un'opera *neutra*, quindi la possibilità di decontestualizzarla rispetto a un luogo così denso di storia e di tradizioni, il quarto ponte sul Canal Grande si presenta, invece, nella sua straordinarietà, capace di emozionare, di condensare opposti, poesia e razionalità, bellezza e verità, semplicemente, architettura e ingegneria. Il suo carattere, spiccatamente innovativo, il suo essere, al contempo, ponte e opera d'arte, scultura urbana ricca di suggestioni, rientrano nell'intento di fare di Venezia una città-modello dell'arte e dell'architettura contemporanea, proiettata al futuro, sulle basi di un glorioso passato. Un ponte, connotato da siffatta bellezza, quasi *stupefacente*, alla stregua degli altri tre celebri attraversamenti sul Canal Grande (il ponte di Rialto, il ponte degli Scalzi, il ponte dell'Accademia) con i quali si

è soliti confrontarlo, si presenta, nelle forme, nei materiali, nelle soluzioni tecnologiche adottate, risultato di una sorta di "selezione naturale", volta a delineare la tipologia più confacente a una realtà tanto particolare, qual è quella veneziana. Sebbene sia stata spesso avversata, la forma scelta, quella ad arco fortemente ribassato, è la più congeniale, dati i vincoli imposti dal contesto: la necessità di garantire un adeguato franco libero per la navigazione ha indotto Calatrava a prediligere detta soluzione, a quella tradizionale di ponte a travata, ponendosi in continuità col predecessore Miozzi. Assumendo, tra i tanti, quale parametro caratterizzante i ponti ad arco il rapporto L^2/f , tra la luce coperta e la freccia, atto a indicizzarne il ribassamento, il ponte della Costituzione, riuscendo a superare una luce di 81 m, con una freccia, valutata in asse all'arco centrale di (4.5 m + 2.5 m = 6.0 m), presenta un L^2/f pari a 930, circa sei volte maggiore di quello stimabile per il ponte degli Scalzi ($L=40$ m, $f=6.75$ m, $L^2/f=238$), propendendo verso un primato mondiale, seppur ancor lontano

dal caso del ponte Infante Dom Henrique di Adão da Fonseca, per il quale, coprendo una luce di 280 m con una freccia di 25 m, si valuta un L^2/f di 3136.

Al pari dei preesistenti ponti sul Canal Grande, questa passerella pedonale che sorge in un luogo strategico per Venezia: unendo la stazione ferroviaria e piazzale Roma, diviene, per il visitatore, il primo attraversamento da percorrere per spostarsi verso sud, un biglietto da visita della città lagunare, la prima impressione percettibile che di questa si ha. Il ponte collega due importanti versanti per Venezia, creando un nuovo spazio urbano lungo il Canal Grande: attraverso apposite rampe e scale ai piedi delle sue spalle, si integra perfettamente col contesto, consentendo l'inserimento di due nuove aree che fungono da prolungamento dello stesso, formanti, simbolicamente, uno spazio celebrativo per la città. Le spalle del ponte, in calcestruzzo come i diaframmi di fondazione, a forma di mezzaluna, non occupano tutto il lato della sponda, lasciando libera visuale dell'intradosso del ponte. La parte arcuata del ponte tra le

due spalle ha una struttura in acciaio inox, adeguatamente trattato per resistere alla corrosione da acqua salmastra. Una cassa d'appoggio, anch'essa in acciaio inossidabile, unisce la struttura articolata del ponte alla forma dinamica delle pile terminali. Come nella consuetudine veneziana, parte della pavimentazione del ponte è stata realizzata in pietra d'Istria, parte in vetro temperato, materiali alternati in modo da impedire scivolamenti. Con ringhiera in vetro, il ponte è illuminato dal basso verso l'alto, creando, così, un effetto scenografico che ne accentua la struttura; la trasparenza della pavimentazione, con l'aggiunta dell'illuminazione dal basso, rispettosa della legge sull'inquinamento luminoso, fa sì che si venga a creare sul ponte un vero e proprio sentiero da percorrere. In risposta a eventuali riserve circa barriere architettoniche riguardanti il ponte, è disposta l'adozione di un servoscala (ovovia) per disabili: in tal caso, per minimizzare atti di vandalismo, si ricorre, per la piattaforma mobile, a una stiva nella spalla del ponte, che può essere chiusa e resa invisibile dopo l'utilizzo.

L'incarico dell'esecuzione dei lavori venne affidato dopo la gara d'appalto alla rodigina Cignoni: sebbene nel 2002 i tempi stimati per la realizzazione fossero di soli 456 giorni essi si protrassero per sei anni.

Dopo vari rinvii, dubbi sulla stabilità e polemiche circa la lievitazione dei costi, i lavori per la posa in opera dei primi due conci laterali ebbero inizio il 28 luglio 2008, impiegando appoggi provvisori: il trasporto degli elementi da assemblare, in due fasi, una per i due conci laterali e una per il centrale di chiusura, avvenne via mare dal porto di Marghera alla sede definitiva.

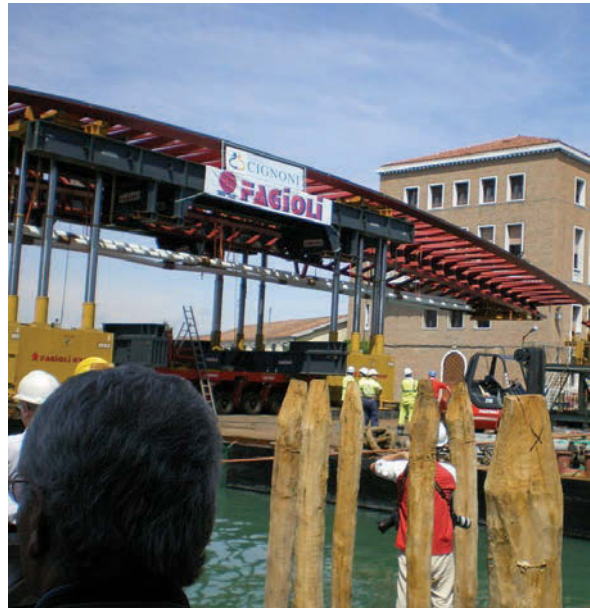
La mattina dell'11 agosto 2007 fu disposto il concio centrale: inizialmente fu posizionata la chiatta e il concio sopra di essa fu ruotato di 90 gradi; successivamente il concio fu sollevato e calato dall'alto appoggiandolo, con notevole precisione, sui due supporti provvisori che già sostenevano i conci laterali.

Tra agosto e settembre venne saldato il concio centrale ai laterali e, una volta completate le saldature, il 21 settembre

si poterono allentare i tiranti e abbassare gli appoggi delle pile provvisorie così da prendere in forza sulle spalle il ponte, controllando con martinetti l'entità del carico e con sensori eventuali cedimenti delle spalle.

La prova di carico, avvenuta nel novembre del 2007, ebbe esito positivo (figure 2-4).

Denso della *concinnitas* albertiana, di un aulico virtuosismo formale, di quella ricercatezza nei materiali che ne fa un'opera d'arte, il ponte della Costituzione nasce dall'intento dell'Amministrazione veneta di consegnare alla città una passerella pedonale all'altezza dei tre celeberrimi ponti sul Canal Grande; da qui la scelta di affidare il progetto a un'artista, un progettista tra i più importanti dell'ultimo secolo, qual è Calatrava, con la consapevole responsabilità di consegnare alla storia una struttura destinata a durare nel tempo. Il risultato è un'opera virtuosa, e ingegneristicamente, per l'arditezza delle soluzioni strutturali adottate, e architettonicamente, per i valori edonici di cui è in grado di approfondire l'ambiente urbano circostante.





2. Ponte della Costituzione, trasporto del concio centrale, passaggio al di sotto del ponte di Rialto

3. Ponte della Costituzione, posa in opera del concio centrale

4. Ponte della Costituzione, chiusura della struttura metallica

I quattro ponti sul Canal Grande: una storia lunga quasi cinque secoli

14

Nel suo celebre *Traité des ponts, ou il est parlé de ceux des Romains & de ceux des modernes* del 1716, Henri Gautier descrive Venezia, con i suoi 359 ponti, la città col più alto numero di passerelle pedonali, caratterizzate da particolari forme e soluzioni strutturali frutto di una continua ricerca protesa al raggiungimento del giusto connubio tra gusto architettonico e aspetti propriamente ingegneristici.

Da secoli signora indiscussa di quella laguna che conta più di 118 isole e 150 canali, Venezia è fortemente radicata nelle sue tradizioni storiche, dal retaggio chiaramente visibile anche nelle consuete pratiche costruttive.

Data la sua morfologia, la città ha da sempre visto la necessità di realizzare una fitta rete di passerelle che consentissero di attraversare i *rii*: il *background* culturale, così come il contesto urbano, ovvero la caratterizzazione geologica del sito ne hanno indubbiamente influenzato,

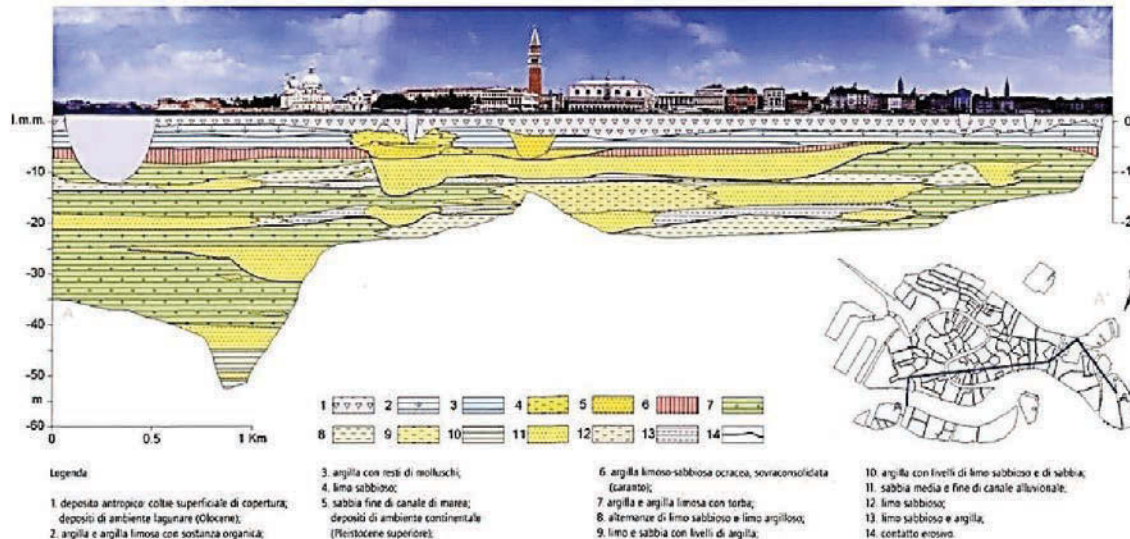
nel corso dei secoli, la progettazione. Come gli altri tre attraversamenti sul Canal Grande, anche il ponte della Costituzione va a rapportarsi alle limitazioni, geologiche e urbanistiche, innanzi citate.

Vincolante è, *in primis*, la morfologia del suolo (figura 5). A un primo strato di riporto (1-5 m), si alternano, fino a una profondità di circa 15 m, argilla di media consistenza, lino sabbioso e sabbia sottile, quindi argilla sabbiosa e limosa consolidata. In risposta all'elevata deformabilità del sottosuolo veneziano si è, da sempre, palesata una predilezione per fondazioni di tipo indiretto: dagli arginamenti ai primi insediamenti lagunari agli ancestrali attraversamenti a ridosso dei canali è stato, da sempre, previsto l'impiego prevalente di pali, fin dalle prime realizzazioni con elementi in larice o quercia (densità media di 9 pali/mq, diametro usuale variabile tra 20-25 cm, lunghezza di 3-6 m).

5. Venezia e il suo sottosuolo, struttura sedimentaria ricostruita in base alle correlazioni litostratigrafiche nei depositi del Pleistocene superiore-Olocene del centro storico di Venezia, tra Giudecca, Canal Grande, San Marco e Sant'Elena.

Da: F. Zezza, *Geologia, proprietà e deformazione dei terreni del centro storico di Venezia;*

Geologia e progettazione nel centro storico di Venezia. La riqualificazione della città e dei territori, Padova 2007, p. 21



Oltremodo limitante, nelle scelte progettuali, è il rapporto con un contesto così intriso di storia, di quella *venezianità* fatta di esigenze, anche di resistenze, che trovano spesso una difficile via d'incontro con la modernità. A dimostrarlo sono, difatti, le vicissitudini che da sempre accompagnano la realizzazione di nuovi ponti sulla laguna.

Alle poche dozzine di attraversamenti che si contavano a Venezia agli inizi del 1200, se ne aggiunsero un gran numero nella seconda metà del secolo, quando la partecipazione alla Quarta Crociata permise alla Serenissima di conquistare le località più importanti dell'Impero bizantino e di spingersi fino in Siria ed Egitto. Toccato il culmine della propria potenza dominando i traffici commerciali tra Europa e Oriente, la Serenissima divenne ben presto una delle Repubbliche marinare più importanti del Mediterraneo. Il fiorire dell'economia si rifletté sulla necessità di realizzare nuove costruzioni, *in primis* degli attraversamenti pedonali, sui cosiddetti *rii*, che garantissero un franco libero adeguato alla navigazione e per la cui costruzione

si videro alternarsi due tipologie prevalenti: quella a travata e quella ad arco. Sebbene con l'aumentare della luce i ponti a travata richiedano travi di inerzia maggiore, quindi impalcati di altezza crescente, questa sarebbe la tipologia più confacente alle condizioni del sottosuolo veneziano, essendo in grado di trasferire i carichi, fissi o accidentali, come forze verticali in corrispondenza degli appoggi. Essa richiede tuttavia lunghe rampe d'accesso per raggiungere la quota necessaria al libero transito delle imbarcazioni. Gli archi sono strutture fortemente spingenti, in grado di contrastare i carichi verticali mediante forze orizzontali, trasmesse, in fondazione, a un sottosuolo, quello veneziano, alquanto deformabile. I ponti ad arco a sesto ribassato risultano tuttavia essere la tipologia prevalente a Venezia; coniugando funzionalità ed estetica essi hanno maggiore attitudine a integrarsi nel contesto, assicurando nel contempo un'adeguata luce libera per la navigazione grazie solo alla loro forma. Stando a quanto detto, non c'è da meravigliarsi se per il primo ponte dell'Accademia, uno



6. Ponte dell'Accademia (anni '30) per breve tempo furono contemporaneamente visibili la passerella pedonale a travata unica di Alfred Neville e il ponte ad arco ligneo di Eugenio Miozzi

dei quattro attraversamenti oggi presenti sul Canal Grande, completato nel 1854, si sia optato per lo schema di trave isostatica a campata unica (figura 6). In precedenza, nel 1838 l'architetto Giuseppe Salvadori aveva avanzato varie proposte, una delle quali prevedeva anche un tunnel sotto il canale per non intralciare il traffico delle imbarcazioni. Dopo un'interruzione dovuta ai moti insurrezionali del 1848 contro il governo austriaco, nel 1852 venne approvato il progetto dell'ingegnere inglese Alfred Neville – che in Europa, aveva già diretto la costruzione di decine di ponti metallici sospesi – di una struttura a una sola travata orizzontale di 50 m di luce.

Come la passerella prossima alla stazione ferroviaria, sempre del Neville, anche il ponte della Carità (dal nome del complesso religioso che ora ospita le Gallerie dell'Accademia) non fu ben accetto ai Veneziani, perché di forma troppo *tecnica*

e perché il franco di soli quattro metri creava difficoltà alla navigazione. Al fine di ridurre il peso e limitare il carico trasmesso in fondazione si optò per una versione con sezione aperta a travature reticolari e impalcato di collegamento ma, a seguito di evidenti problemi di stabilità, le autorità richiesero anche la riduzione della larghezza della zona transitabile. Dopo alcuni decenni il ponte della Carità, poi chiamato ponte dell'Accademia, cominciò a far mostra di problemi statici dovuti alla snellezza della struttura e di un avanzato stato di corrosione dei materiali. In attesa della costruzione di un nuovo ponte in pietra per il quale fu indetto un concorso vinto dagli architetti Torres e Briazza, venne costruito in soli 37 giorni un ponte provvisorio in legno su progetto di Eugenio Miozzi, indiscusso regista della grande trasformazione novecentesca destinata a stravolgere equilibri secolari della città. Aperto al pubblico nel febbraio del 1933, il ponte, che all'epoca della sua inaugurazione era il più grande ponte in legno d'Europa, data la sua solidità, non fu più sosti-

tuito. Nato tutto in acciaio nel 1858, tramutato in legno nel 1930, oggetto di un primo, non propriamente riuscito, rimaneggiamento nel 1948, l'attuale ponte dell'Accademia è frutto di un consistente restauro databile al 1984, per cui oggi uno *scheletro* tutto in acciaio si trova integrato, protetto da una *pelle* in legno (vedi Giulio Ballio, Giuseppe Creazza, Luciano Jogna, Giancarlo Turrini, *Progetto e Direzione dei Lavori della ristrutturazione del ponte e della sovrastruttura, per conto dell'Amministrazione Comunale*, 1984). Emblematica, come poche fu, senza dubbio, per Venezia la figura di Eugenio Miozzi. Attuando una rivoluzione urbanistica d'importanza paragonabile, se non superiore, a quella esercitata dal governo austriaco a metà '800, a lui si deve il collegamento definitivo di Venezia alla terraferma con la creazione del ponte automobilistico che definiva la nuova direttrice di sviluppo della parte occidentale della città divenuta, poi, a tutti i livelli, l'area di accesso al centro storico lagunare. Le riserve con le quali le opere di Miozzi vennero in seguito valutate furono il sin-



7. Alfred Neville, ponte degli Scalzi (1858) con struttura a travata



8. Eugenio Miozzi, ponte degli Scalzi (1934), struttura ad arco in pietra d'Istria

9. Ponte degli Scalzi (1934), costruzione secondo il sistema delle *lesioni sistematiche*



tomo più evidente del disagio conseguente al grande processo di riqualificazione urbana realizzato nei primi decenni del secolo scorso. Il periodo di attività comunale del Miozzi, negli anni Trenta, coincise, di fatto, con l'epopea fascista caratterizzata da un monumentalismo di regime e dalla logica di sventramento del "piccone risanatore", che impresse in breve tempo alla città una svolta modernista. Abile mediatore, sempre però rispettoso della singolarità veneziana, progettò ed effettuò anche la sostituzione del ponte degli Scalzi, altra struttura ottocentesca in ferro del Neville sul Canal Grande nei pressi della stazione ferroviaria, con un nuovo ponte in pietra d'Istria (figure 7 e 8) i cui lavori ebbero inizio il 4 maggio 1934. Edifici di pregio architettonico come la chiesa di Santa Maria di Nazareth (o degli Scalzi), il palazzo Foscari Contarini e la chiesa di San Simeon Piccolo, spinsero Miozzi a progettare un'opera dal carattere monumentale, ma al contempo estremamente esile nelle forme e in armonia con l'ambiente circostante. Il ponte venne costruito unicamente con

conci di pietra d'Istria –materiale utilizzato ampiamente a Venezia nelle strutture e rivestimenti urbani – senza alcun rinforzo metallico, soluzione preferita alle strutture in calcestruzzo di cemento armato sia per la longevità del materiale non suscettibile di corrosione da cloruri, la durabilità (500-1000 anni) e per non transigere dal carattere aulico che l'opera avrebbe, comunque, dovuto avere. L'arco è lungo complessivamente 55 m, su una luce di 40 m, con freccia di 6.75 m ($f/L=1/6$), largo 7 m, a sezione variabile, da 1.30 m in appoggio a soli 0.80 m chiave, per un indice di snellezza (ha/l) di $1/50$. Non consentendo i metodi tradizionali la costruzione di una siffatta struttura totalmente in pietra, per il ponte degli Scalzi venne impiegato, un particolare accorgimento progettuale e costruttivo, detto "metodo delle lesioni sistematiche compensative", messo a punto dallo stesso Miozzi. Il metodo prevedeva venissero create artificialmente nell'arco tre lesioni, in chiave e in corrispondenza delle imposte, aperte all'atto della posa in opera dei conci, progressivamente chiuse

rimuovendo la centina (figura 9). Il sistema permetteva inoltre di eliminare sollecitazioni parassite dovute a fattori come deformabilità del materiale o variazioni termiche, lasciando lo schema isostatico fino al disarmo, consentendo di correggere conseguentemente la posizione della fibra media dell'arco e assicurando il passaggio all'interno del terzo medio della curva delle pressioni. Esso prevedeva l'impiego di un'unica centina metallica, a tutta luce, a tre cerniere, che, tra l'altro, consentì anche di verificare la resistenza della spalle prima che i carichi della volta entrassero in esercizio: l'arco lapideo prese forma gradualmente al di sopra della centina, disponendo innanzitutto alle imposte due tronchi formati da sei blocchi cadauno; vennero poi collocati gli undici conci costituenti il tronco in chiave, procedendo simmetricamente dagli estremi nel collocare i restanti quattro blocchi. I conci furono assemblati a secco, frapponendovi lastre di piombo; per rendere solidale il sistema, tra i tronchi adiacenti fu posto un concio di chiusura (detto *di serraglia*).

10. Vittore Carpaccio,
*Miracolo della Croce
a Rialto*
(1496), Vene-
zia, Gallerie
dell'Accade-
mia



Un rapporto contrastato, equivocado, a volte molto sofferto è, come visto, quello che da sempre lega la città lagunare alle espressioni della modernità, specialmente in campo architettonico: da Andrea Palladio a Santiago Calatrava, oltre cinque secoli di storia rivelano come sia difficile combinare scelte progettuali con una *venezianità* così radicata, che scende di rado a compromessi. La città ha subito, nei secoli, profonde trasformazioni, e urbanistiche e architettoniche, assumendo un carattere simile a quello che oggi la connota tra il XIII e il XIV secolo, quando la rivoluzione costruttiva del laterizio e della pietra trasformò il precedente paesaggio urbano fatto di case in legno. Nel 1496 il pittore, Vittore Carpaccio, ritraendo la città nella sua veduta urbana *Miracolo della reliquia della Croce al ponte di Rialto*, raffigurò Venezia in piena rivoluzione costruttiva e architettonica, sebbene permanesse

ancora un “residuo eccezionale” della precedente cultura costruttiva, il ponte di Rialto, in legno (figura 10). Le prime notizie in merito risalgono al 1175, quando un ponte, poco più che una passerella posta su barche costruita da un tale Nicolò Starattoni (o Barattieri) unì le due sponde del quartiere di Rialto. I commerci, concentratesi sulla sponda orientale del canale, fecero aumentare il traffico sul ponte galleggiante, che venne sostituito nel 1264 da un primo ponte fisso, in legno su palafitte, costituito da due rampe inclinate, strallate, che si congiungevano in corrispondenza della sezione centrale, mobile a mo’ di ponte levatoio, tale da poter essere sollevata per consentire il passaggio di navi con alte alberature (come da raffigurazione del Carpaccio). Nel 1293 si deliberò la chiusura del ponte, perché deficiente di manutenzione, quindi aperto solo previa autorizzazione e pagamento di una congrua somma di denaro, all’uopo destinata.

Il ponte di Rialto, già dal 1300, fu centro nevralgico della vita sociale e commerciale di Venezia, struttura il cui im-

palcato, originariamente privo di balaustre e copertura, era occupato da mercanti di ogni sorta. Il 15 giugno 1310 il ponte, già fatiscente, venne distrutto nel corso della ritirata dei rivoltosi guidati da Bajamonte Tiepolo; ricostruito in quell’anno, durò fino al 1444, quando crollò sotto il peso della grande folla radunata per assistere al passaggio del corteo della sposa del marchese di Ferrara.

Si succedettero altre ricostruzioni, come quella del 1458, con successivi restauri e ampliamenti, mediante l’inserimento di due ordini di botteghe, destinate all’affitto, i cui proventi erano devoluti per la manutenzione del ponte. Col passare degli anni, data la potenza ormai consolidata della città, il ponte in legno appariva non più adeguato, necessitando di frequenti restauri e puntellature.

Nel gennaio 1513 la struttura lignea con ponte levatoio, ritratto nella veduta a volo d’uccello di Jacopo de’ Barbari (1500), fu seriamente compromessa da un grave incendio che ne rese necessario il rifacimento con un progetto indubbiamente vincolato dalla necessità di non disporre pile



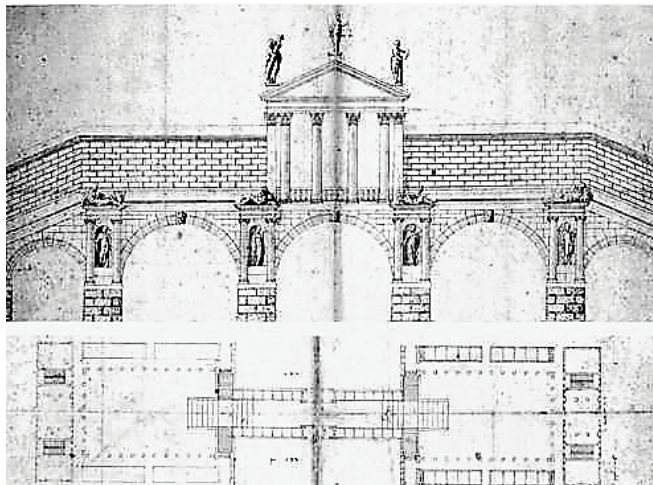
11. Venezia, veduta a volo d'uccello di Jacopo de' Barbari (1500)

in alveo che limitassero la navigazione (figura 11). Nel 1525, il Consiglio dei Dieci deliberò la nomina di tre provveditori con l'incarico di dare soluzione alla costruzione del nuovo attraversamento, ma l'opera dei tre non giunse ad alcuna conclusione, protraendo i restauri dell'esistente ponte in legno dal 1554 al 1581. Il Consiglio della Serenissima, indisce, in realtà senza nulla concretizzare, una sorta di bando pubblico per la costruzione del ponte in pietra: malgrado l'anima della città rimanesse sostanzialmente *gotica*, aveva fatto breccia nel sentore culturale veneziano la rivoluzione rinascimentale, che pur scendendo a patti con la specificità di Venezia, aveva introdotto il gusto per l'antichità classica. È quindi sintomatico che i progetti di ponte avanzati da Sansovino, dal Vignola, dallo Scamozzi (figura 12) facciano proprio il linguaggio classico delle strutture a più archi con edicole e colonne. Anche Andrea Palladio seguì questa impostazione per la sua proposta (figura 13). Con un avanguardistico ponte sormontato da un palazzo pubblico (come visibile in



12. Vincenzo Scamozzi, progetto per il ponte di Rialto (1551)

Capriccio con edifici palladiani del Canaletto), il progetto del maestro vicentino, redatto in due versioni, aveva come presupposto la sistemazione urbanistica dell'intera area ai piedi del ponte con la realizzazione di due corti o fori commerciali: per Palladio il ponte divenne il pretesto per offrire la sua visione, radicalmente moderna, perché alternativa e assoluta, del foro commerciale all'antica a Venezia, città per necessità e tradizione *anticlassica*: la razionale ortogonalità delle corti porticate del Palladio si inseriva a forza nel tessuto veneziano, contrastandone e



13. Palladio, primo progetto per il ponte di Rialto, prospetto a cinque arcate e pianta con due *fori* commerciali ai capi (1551)



14. Canaletto, *Capriccio con edifici palladiani*, (1756-59)

annullandone la natura di labirinto urbano (figure 13 e 14).

Di là dalle innumerevoli proposte pervenute, si continuava, comunque, a tergiversare: solo nel 1581, con lo scioglimento del Consiglio dei Dieci, il Senato incaricò tre nuovi provveditori di dare corso a una proposta progettuale che rispettasse i vincoli inerenti la costruzione in pietra del ponte con asse rettificato in modo da passare tra la chiesa di San Bartolomeo e il suo campanile e prevedendo due ordini di botteghe lungo il ponte, con possibilità di affaccio sul Canal Grande.

La soluzione ad arco unico vinse su quella a tre archi: nel 1587, infatti, il Senato della Serenissima deliberò la costruzione di un ponte in pietra su progetto di Antonio da Ponte; la costruzione, avviata nel 1588, si concluse nel 1591 durante il dogado di Pasquale Cicogna.

Per quanto riguarda la progettazione, il Da Ponte probabilmente ne fu il coordinatore, ma della stessa sono accreditati anche Alvise Baldù e Vincenzo Scamozzi.

La struttura è molto simile a quella del precedente ponte in legno, segno della corretta concezione originale. Due rampe inclinate, con negozi su entrambi i lati, portano alla sezione centrale (figura 15). Il ponte, ad arcata unica con larghezza di 22.10 m, è coperto da un porticato lungo complessivamente 48 m e si estende su una luce di 28 m, con freccia di 7.5 m ($f/L=1/4$).



15. Antonio da Ponte, ponte di Rialto, prospetto longitudinale (1588-1591)

Calatrava e il suo contributo nell'evoluzione dei ponti ad arco a via inferiore

La *promenade architecturale* lungo il Canal Grande ha sottolineato quanto il contesto, con le sue stratificazioni storiche, la sua cultura, le sue tradizioni costruttive e tecnologiche sia vincolante nella progettazione e realizzazione di un ponte. Dieci secoli di storia hanno messo in evidenza come, nel caso veneziano, la soluzione più frequente, certo più ovvia, meglio integrata sia stata quella dell'arco a via superiore, tipologia per cui l'apporto di Calatrava è stato innovativo. Col ponte della Costituzione il progettista valenziano è riuscito, difatti, a realizzare un sistema ad arco puro, senza i consueti riempimenti tra struttura portante e piano di camminamento, tipici dei ponti in muratura, come evidente sin dai primi esempi di epoca romana. Nel caso veneziano, la discretizzazione adottata da Calatrava per l'arco principale, portando a 73 il numero di sezioni trasversali, gli ha consentito di eliminare la travata longitudinale, realizzando una passerella pedonale il cui calpestio poggia direttamente sulla struttura

portante, a prezzo di una leggera pendenza, consueta, tra l'altro, per i ponti della laguna.

Per quanto attiene i ponti ad arco, dalle prime realizzazioni a oggi, i materiali messi a disposizione dalla storia, hanno consentito di superare grandi luci con strutture in cui il piano di camminamento, identificandosi con quello delle travi, è rimasto distaccato dalla struttura portante; al contempo, è stato possibile sfruttare in maniera diversificata l'interazione tra gli elementi strutturali, conducendo a tipologie alternative, archi a via superiore o inferiore, a seconda della disposizione del piano di calpestio rispetto alla struttura portante (arco o sistema di sospensione). Nell'interazione arco-travi, è demandato alle seconde l'assorbimento delle flessioni da carichi locali, nonché la capacità di trasmettere agli archi sollecitazioni a questi più consone; in al modo, questi ultimi, operanti prevalentemente in regime estensionale, non sollecitati a flessione, sono in grado di coprire, con elementi

dimensionalmente contenuti, luci crescenti, ben oltre gli usuali 40 m dei ponti in muratura, fino a raggiungere i 500 m. In realtà il problema dell'interazione tra regime estensionale e flessionale è stato prodromico non solo per i ponti ad arco, ma anche nell'evoluzione dei ponti sospesi e strallati, nel cui caso è evidenziabile una collaborazione tra i due sistemi, affidando alle funi e agli stralli esclusivamente il regime estensionale. Risulta, a tal punto, interessante, soffermarsi su come, in questo quadro, venga a collocarsi l'operato di Calatrava, con le sue realizzazioni e sperimentazioni sia nel campo dei ponti ad arco a via inferiore, sia strallati, sia nel caso specifico dell'arco puro del ponte della Costituzione. Si sceglie di discorrere in seguito solo sulla prima tipologia, evitando di citare le altre per mancanza di spazio; si vedrà, poi, come il ponte della Costituzione abbia raccolto le sperimentazioni del progettista valenziano, teso a ridurre la funzione della travata longitudinale egli, infittendo le strutture di trasferimento, perviene quasi ad annullarla, conferendo alla struttura estrema leggerezza. Si vuole, quindi, sottolineare in

questa sede, come il ponte della Costituzione rappresenti, a livello internazionale, un *unicum*: riuscendo a eliminare la trave longitudinale, consente di camminare direttamente sulla struttura, senza frapporre alcun elemento di trasferimento o riempimento. Emblematico tra le sue realizzazioni, quasi *summa* del suo percorso formativo-professionale, il quarto attraversamento sul Canal Grande rivela come Calatrava, nella sua continua ricerca di un connubio tra ingegneria e architettura, renda i suoi ponti sintesi di un *iter* progettuale orientato verso forme e tecnologie innovative, in grado di condurre a opere rqualificanti il contesto. Con l'intento di realizzare strutture estremamente eleganti, dotate, al contempo di propria identità e riconoscibilità, propone audaci soluzioni strutturali, prediligendo il regime estensionale anche su piccole luci.

Sfruttando l'interazione tra elementi portanti, arco-trave, arco-pendini, stralli-travata è infatti in grado di ridurre al minimo le dimensioni degli elementi strutturali, *semplicemente* incrementando il numero di sezioni trasversali.

Ne deriva un impalcato smaterializzato, con travata longitudinale discretizzata in un elevato numero di elementi, così da ridimensionare l'effetto dei carichi *viaggianti* su questa (come nel caso delle 73 sezioni del ponte della Costituzione, $L = 81$ m). Dalle sue opere risulta tangibile la capacità di Calatrava d'impiegare semplici regole statiche, attribuendo a ogni singolo elemento strutturale un ruolo ben definito nel funzionamento del ponte, riuscendo, così, a generare forme, di chiara matrice naturalistica, prima impensabili. Nonostante avesse studiato all'Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) dove si insegnava la statica grafica di Carl Culmann, che fondò questa sezione della scuola di Zurigo nel 1855, di cui Maillart, Amman, Isler prima, Lardy, Ritter e Menn poi, furono eredi, Calatrava si discostò notevolmente da quest'applicazione rigorosa dei suoi principi, allo scopo di sviluppare forme più dinamiche ed espressive. Come conseguenza, si potrebbe dire che le sue scelte architettoniche, ingegneristiche e tecnologiche scaturiscano proprio dalla sua insistenza nel voler far convergere il ruolo di ingegnere, di architetto e

di urbanista in un'unica persona. A oggi, l'architetto valenziano ha progettato circa una settantina di ponti. Dei ventotto progettati ad arco, dieci sono stati realizzati e tutti mostrano una particolare attenzione all'estetica dell'ingegneria ed è sempre percepibile come, secondo Calatrava, costruire un ponte sia un gesto simbolico, connesso con le necessità delle persone che lo attraversano e il bisogno di superare un ostacolo fisico.

Nella storia della progettazione dei ponti la tipologia ad arco a via inferiore ha visto la propria nascita con il viadotto di Garabit di Gustave Eiffel (1880-84), derivando direttamente dai più diffusi ponti a via superiore, tipici dell'età antica e medioevale. In particolare è stato grazie allo sviluppo industriale dell'Ottocento che si è potuto approfondire questo sistema, prevedendo per le pendinature l'utilizzo dell'acciaio, materiale dall'elevata resistenza a trazione, non disponibile fino ad allora. Il susseguirsi degli sviluppi della tecnica e della tecnologia, ha consentito una rapida evoluzione della progettazione, portando a una progressiva riduzione, fino a

valori esigui, degli indici adottati di consuetudine per i ponti a via inferiore, atti a parametrizzare la distribuzione delle sospensioni, mediante rapporto tra l'interasse dei cavi e la luce della campata centrale (ip/L), quindi a parametrizzare la snellezza dell'arco (ha/L), della travata (ht/L) o della struttura nel complesso (h^*/L), comparandone i rispettivi spessori alla luce della campata principale.

La tipologia dei ponti a via inferiore ben lascia intendere, nel suo percorso evolutivo, l'avvenuta scissione, tra comportamento ad arco e a trave, ovvero il passaggio, a livello statico, dal regime flessionale a quello estensionale. È solo a partire dai primi decenni del XX secolo che si assiste alla realizzazione dei primi esemplari, progettati facendo in modo che momenti da carichi simmetrici e asimmetrici siano interamente assorbiti dagli archi le cui grandi dimensioni lasciano alla travata il solo compito di resistere alle sollecitazioni dovute all'interasse dei cavi di sospensione. Questo approccio porta Amman a realizzare a New York, nel 1931, uno dei ponti con campata singola più lunga al mondo, il ponte

di Bayonne di 504 m (figura 16). L'arco, alto circa 20 m a sezione pressoché costante, sostiene un impalcato di circa 5 m sospeso a 46 m sulla baia sottostante; è evidente che qui l'elemento principale è l'arco con una snellezza (ha/l) del 4%, valore piuttosto elevato, giustificato principalmente dalla scelta di utilizzare strutture reticolari che, pur garantendo elevati momenti d'inerzia, hanno dimensioni rilevanti.

Allontanandosi dalla tradizione degli archi rigidi, l'*input* a una nuova metodologia progettuale mirante a invertire i ruoli tra arco e travata si deve a Joseph Langer, che nel 1871 ipotizzò che dovesse essere quest'ultima a dover assorbire, in gran parte, i momenti flettenti della struttura. Mentre nei precedenti ponti ad arco la distribuzione dei tiri dei pendini corrisponde a quella dei carichi variabili che agiscono sull'impalcato, nel sistema Langer è la forma dell'arco che governa la distribuzione dei tiri dei pendini, che è sempre quella di cui l'arco è funicolare. Ne è un esempio il ponte di Fremont a Portland del 1973 (figura 17) che, per una luce massima di 383 m, utilizza una travata alta 15 m con una



16. Ponte di Bayonne, New York, (1928-1931)



17. Ponte di Fremont, Portland, (1973)



18. Ponte Lupo, Shanghai, (2000-03)

conseguente snellezza del 4%. La difficoltà nel rendere più efficiente il sistema ad arco a via inferiore è ben evidente sino ai giorni nostri; noto, in proposito, è il caso del Lupu Bridge (Shangai, 2003) per il quale, su una luce decisamente maggiore del Fremont, di 531 m, si accostano due archi con un $ha/L = 1/40$ (2.5%) (figura 18).

La problematicità inerente la capacità di gestire, ottimizzando, l'interazione tra gli elementi portanti è maggiormente evidente nel più recente ponte Chaotianmen a Chongqing del 2008 dove addirittura la trave e l'arco, per una luce di 552 m hanno, nuovamente, sezione reticolare per di più dalle dimensioni prossime tra loro (figura 19).

Statico permane il percorso verso la snellezza degli elementi strutturali anche in Europa, ove con il ponte Apollo di Bratislava del 2005 (figura 20), non si può certo affermare che nell'ultimo ventennio sia stata compiuta un'ottimizzazione del sistema ad arco a via inferiore: il ponte consta di una travata a tre cassoni collegati da dei traversi fitti, a formare un sistema ridondante, dissonante rispetto alla pendinatura

posizionata esternamente alle carreggiate, andando così a trascurare la capacità dell'intero sistema arco-trave di resistere a torsione. Senza dubbio meno avanguardistici sono gli esiti della progettazione "all'italiana" da cui è leggibile una chiara tendenza a sovradimensionare la struttura di sospensione anche per piccolissime luci, come nel caso del ponte della Musica a Roma, del ponte a Vallecrosia e del ponte Spizzichino a Roma (figura 21), terminato nel 2012 con una snellezza dell'arco pari a 1/15.

Come si evince dall'*excursus* tracciato, è consuetudine, nei ponti su grandi luci, operanti prevalentemente in regime estensionale, che le sollecitazioni flettenti siano assorbite da travi longitudinali: il più grande apporto di Calatrava, consiste nell'aver ricondotto al solo regime estensionale il funzionamento dei suoi ponti. Il crescente numero di sezioni trasversali, ovvero il ricorso a un fitto sistema di sospensione garantiscono un rapido trasferimento dei carichi, senza la necessità di impiegare travi longitudinali di eccessive dimensioni, fino quasi ad annullarle. Le sue opere rivelano come,

dal suo approccio progettuale, derivi un'estrema libertà nelle forme che, unita alla cura per i dettagli e alla ricercatezza dei materiali, hanno consentito a Calatrava di realizzare opere di indubbio pregio artistico. Ciò è ben visibile già nel primo ponte, il Bach de Roda (1985-87) (figure 22-24) caratterizzato da un ha/L di $1/70$, ht/L di $1/25$, ip/L di $5,40\%$, con sistema a spinta eliminata; la struttura consiste in quattro archi accostati in coppie, in corrispondenza delle due corsie pedonali, con sistema di sospensione a cavi inclinati, scelta che consente di ridurre fortemente l'instabilità dell'arco fuori dal piano, offrendo un'ottimizzazione del sistema già proposto nel ponte di Fehmarn del 1963.

Analogo approccio caratterizza il ponte Oudry-Mesly (1985-87), contemporaneo al Bach de Roda: si tratta di una passerella pedonale con impalcato scandito da *costole* a interasse variabile lungo la luce (massimo in appoggio 5.20 m), che rimandano i carichi a esili archi tubolari in acciaio ($ha/L = 1/144$, $ht/L = 1/44$) mediante cavi di sospensione, intervallati ogni $1,9$ m, per un rapporto ip/L di $3,53\%$ (figure 25-27).

Utilizzare un interasse fra le sezioni trasversali molto ridotto consente di diminuire il momento d'inerzia della travata, scaricando quest'ultima rispetto all'arco superiore: l'assenza di collegamenti diagonali fra le sezioni trasversali fa sì che tutto il momento torcente per carichi trasversalmente asimmetrici sia trasferito al sistema soletta-travi longitudinali e, tramite le pendinature, all'arco superiore.

Equamente collaboranti alla funzione portante risultano, invece, arco e trave del ponte Lusitania di Merida (1988-91): con rimando a forme quasi antropomorfe, si configura come una spina dorsale il cassone centrale post-teso, elemento principale dall'elevata rigidità flessio-torsionale nella distribuzione carichi; con arco reticolare e pendinatura disposta ogni 6.7 m, il Lusitania presenta ha/L di $1/54$, ht/L di $1/40$, ip/L di 3.6% .

Se le forme plastiche del ponte di Ondorroa (1989-95), con rapporti ha/L di $1/111$, ht/L di $1/20$, ip/L di 4.16% , rendono chiaro il percorso delle forze, ancor più leggibile è il funzionamento statico del ponte Alameda (1989-91), che rivela



19. Ponte Apollo, Bratislava (2003-2005)



20. Ponte Chaotianmen, Chongqing (2004-09)

21. Ponte (Settimia) Spizzichino, Roma (2009-12)



22. Santiago Calatrava,
ponte Bach de Roda,
Barcellona (1985-87)
 $L'=129$ m; $L=46$ m;
 $f=10$ m; $f/L=1/5$; $ip/L=5.4\%$; $ha/L=1/71$;
 $ht/L=1/5$



una più chiara ripartizione delle sollecitazioni tra l'arco inclinato e la travata a cassone pluriconnesso: per questo ponte a sospensione rigida, l'interasse fra le pendinature copre una buona porzione di luce arrivando a un ip/L di 4,4%. Significativo è il caso del ponte Campo De Volantin (1994-97): passando attraverso un primo disegno con arco inclinato e sistema di sospensione rigido, il progetto definitivo declina in favore della più tradizionale soluzione a cavi convergenti superiormente con interasse di 1,5m (ip/L 1,5%), con conseguente alleggerimento radicale della struttura del ponte inferiore ridotto a tre semplici tubolari (ha/L di 1/66, ht/L di 1/750). Si estremizza, così, la tendenza a *vertebrizzare* la struttura annullando le travi longitudinali, cui è demandata la sola funzione di eliminare la spinta dell'arco e d'irrigidire la sezione trasversale per i momenti torcenti (figura 28). Elevata rigidezza torsionale è, invece, garantita dal cassone centrale a pareti chiuse che, sul modello dell'Alamillo di Siviglia, caratterizza il ponte Centrale di Reggio Emilia (2004-06) con singolo piano di suspensio-

ne; l'elevata densità di sezioni trasversali direttamente caricate dalla piastra ortotropa dei carichi accidentali, ovvero la sua fitta strallatura (ip/l di 1,59%) consentono, anche in tal caso, uno snellimento sostanziale della sezione della travata (figura 29). Tenendo conto a cento anni di distanza del percorso tracciato da Gustave Eiffel, indiscusso genio innovatore dei ponti ad arco su grandi luci, chi ha assunto il nuovo ruolo di *riformatore* del settore è stato proprio Calatrava che, con le sue numerose realizzazioni, ha affinato soluzioni nuove portando a una massima ottimizzazione di arco e travata, infittendo le pendinature e le travi trasversali, quasi a *vertebrizzare* la struttura. Nel più generale percorso evolutivo dei ponti ad arco a via inferiore, il suo contributo risulta rilevante: caratterizzante il sistema di sospensione, per quanto concerne il rapporto tra interasse cavi e luce della campata principale (ip/L) si nota un progressivo infittimento della pendinatura, quindi un conseguente ridursi dell'indice anzidetto, fino a ip/L di 1.59 stimabile per il ponte di Reggio Emilia.



23. Santiago Calatrava, Bach de Roda, Barcellona, dettaglio appoggio



24. Santiago Calatrava, Bach de Roda, Barcellona, dettaglio ancoraggio cavi

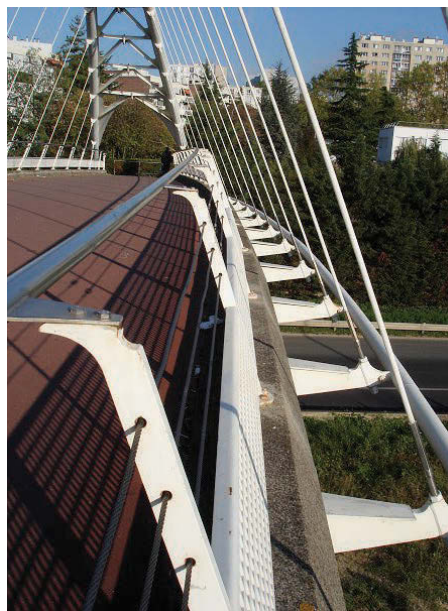




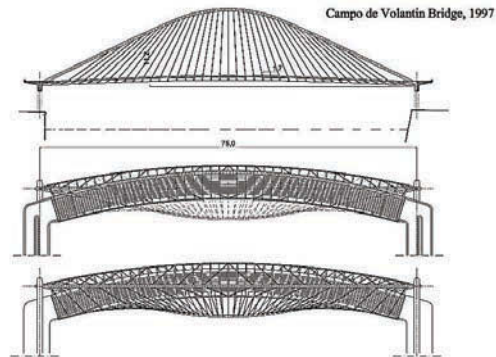
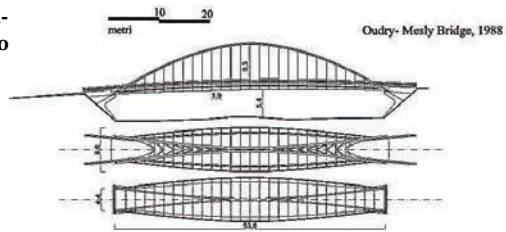
25. Santiago Calatrava, Oudry-Mesly, Créteil, (1985-87), $L'=120\text{m}$;
 $L=55\text{m}$; $f=8\text{m}$; $f/L=1/7$; $ip/L=3.45\%$; $ha/L=0.70\%$; $ht/L=2.20\%$

26. Santiago Calatrava, Oudry- Mesly, Créteil, (1985-87), dettaglio
 pendinatura

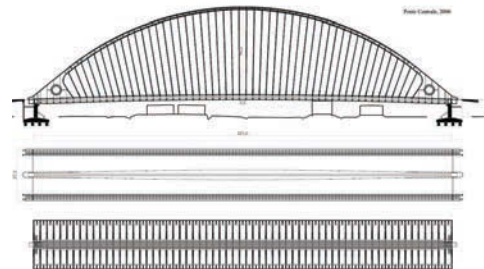
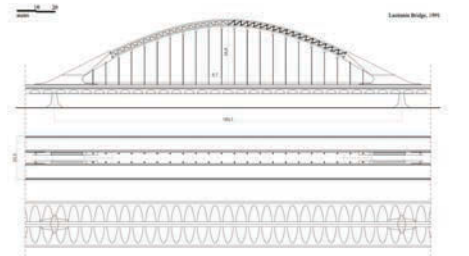
27. Santiago Calatrava, Oudry- Mesly, Créteil, dettaglio ancoraggio cavi



28. Santiago Calatrava, progetto di passerelle pedonali



29. Santiago Calatrava, progetto di ponti

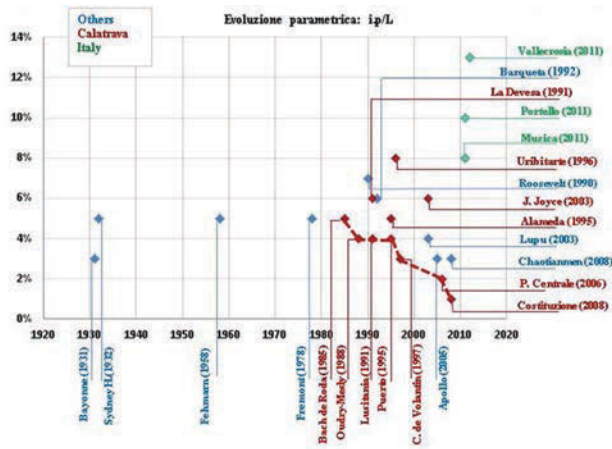


I grafici rimarcano ulteriormente il ruolo di grande innovatore attribuibile a Calatrava.

Nello specifico, per quanto concerne il parametro ip/L , è registrabile negli anni una sostanziale riduzione dell'interasse dei collegamenti tra arco e trave. Tralasciando le strutture in cui è presente un sistema di sospensione rigida, che non seguono la normale decrescita dell'interasse nel tempo, ci si focalizza su quelli con pendinatura flessibile. Per questi ultimi si ha un andamento decrescente, quasi lineare dell' ip/L , con valori sempre al di sotto del 10%, prossimi, nei casi più estremi, all'1%. Riguardo al rapporto arco-trave, leggibile attraverso la loro snellezza, si nota come nelle opere non riconducibili all'autore si sia alternata più volte la predominanza dell'uno rispetto all'altra. Calatrava, di contro, pone sempre l'arco come oggetto snello, rendendolo estremamente efficiente, nonostante la sua esile sezione, grazie a una progettazione che tiene conto di una ponderata distribuzione delle

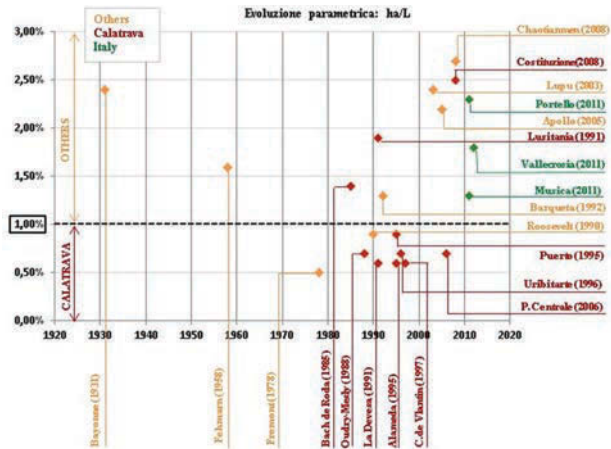
		l_p/L	h_p/L	h_a/L	h^*/L
1931	Bayonne (1931)	3%	2,40%	0,60%	1,50%
1932	Sydney H. (1932)	5%		0,80%	4,40%
1958	Fehmarn (1958)	5%	1,60%	1,00%	1,30%
1978	Fremont (1978)	5%	0,50%	3,90%	2,20%
1985	Bach de Roda (1985)	5%	1,40%	4,10%	2,70%
1988	Oudry-Mesly (1988)	4%	0,70%	2,20%	1,40%
1990	Roosevelt (1990)	7%	0,90%	1,80%	1,30%
1991	Lusitania (1991)	4%	1,90%	2,60%	2,30%
1991	La Devesa (1991)	6%	0,60%	1,40%	1,00%
1992	Barqueta (1992)	6%	1,30%	4	2,65
1995	Puerto (1995)	4%	0,90%	5,10%	3,00%
1995	Alameda (1995)	5%	0,60%	2,00%	1,30%
1996	Uribitarte (1996)	8%	0,70%	1,60%	1,10%
1997	C. de Volantin (1997)	3%	0,60%	1,30%	1,00%
2003	Lupu (2003)	4%	2,40%	1,30%	1,90%
2003	J. Joyce (2003)	6%		-	-
2005	Apollo (2005)	3%	2,20%	3,50%	2,80%
2006	P. Centrale (2006)	2%	0,70%	1,20%	1,00%
2008	Costituzione (2008)	1,00%	2,50%	0	2,5
2008	Chaotianmen (2008)	3%	2,70%	2,20%	2,40%
2011	Musica (2011)	8%	1,30%	1,60%	2,30%
2011	Portello (2011)	10%	2,30%	2,40%	2,80%
2012	Vallecrosia (2011)	13%	1,80%	2,00%	2,60%

30. Evoluzione dei ponti a via inferiore leggendo Calatrava: riepilogo dei parametri progettuali



31. Evoluzione parametrica: ip/L

sollecitazioni sui singoli elementi che compongono la struttura; tale approccio gli ha consentito di raggiungere



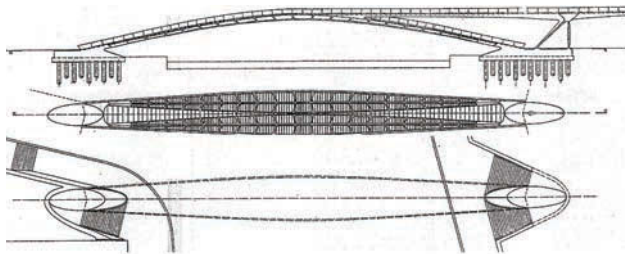
32. Evoluzione parametrica: ha/L

ridotti indici di snellezza, come nel caso del ponte Campo de Volantin, con un $ha/L = 1/166$ (figure 30-32).

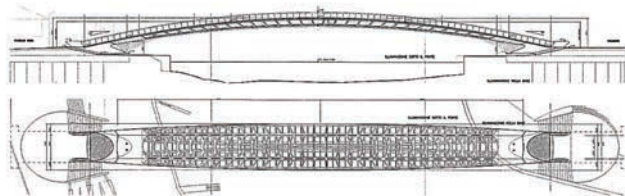
Il Ponte della Costituzione a Venezia: ragioni e analisi del quarto arco sul Canal Grande

Rientrando appieno nella metodologia progettuale fin qui descritta, diviene quasi summa del *modus operandi* di Calatrava il quarto ponte sul Canal Grande che, con la sua forma ad arco fortemente ribassato costituisce la massima espressione della capacità del progettista valenziano di realizzare strutture straordinarie riuscendo a coprire una luce di 80,80 m con una freccia di 4.5 m; le ingenti spinte che ne conseguono sono assorbite da due grandi sistemi di diaframmi, fondazione di tipo profondo che consente, tra l'altro, di minimizzare i cedimenti del terreno. Come osservabile anche in altre opere, nell'evoluzione del progetto del ponte della Costituzione è leggibile un progressivo infittimento del numero di sezioni trasversali, passando dalle 21 del progetto preliminare (figura 33), alle 32 del definitivo (figura 34) fino alle 73 dell'esecutivo (figura 35), cui corrisponde una riduzione dell' ip/l da 4,7% a 3,1%, fino a 1,3%. Ne consegue la possibilità di conte-

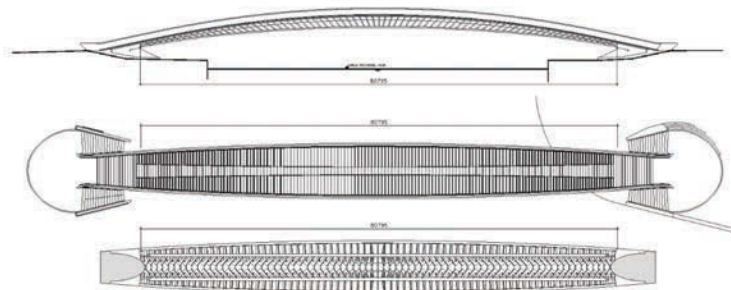
nere, dimensionalmente, gli elementi, riducendo le due travi reticolari previste in fase preliminare a un solo arco centrale rigido torsionalmente, realizzando una sezione alta soli 2 m, con un indice di snellezza h/L pari a 1/40. In tal caso, il processo di *vertebrizzazione*, traducibile, per i ponti a via inferiore, in un progressivo infittimento del sistema di sospensione tale da consentire un'ottimizzazione, in termini dimensionali, della travata longitudinale, quasi fino ad annullarla, comporta, per il ponte della Costituzione, l'eliminazione delle strutture secondarie, quindi la realizzazione di un arco continuo. Calatrava riesce così a perfezionare la soluzione del predecessore Miozzi: la spezzata, poligonale a tre tratti, che caratterizza il ponte degli Scalzi, viene discretizzata al punto tale da consentirgli di realizzare una curva continua; al contempo, il ridotto interasse tra le sezioni, approssimabile a poco più di un metro, consente d'impiegare per la pavimentazione, in accostamento



**33. Ponte della Costituzione, progetto preliminare, $ip/\approx 4.7\%$;
21 sezioni**



**34. Ponte della Costituzione, progetto definitivo, $ip/\approx 3.1\%$;
32 sezioni**



35. Ponte della Costituzione, progetto esecutivo, $ip/\approx 1.3\%$; 73 sezioni

alla tradizionale pietra d'Istria, lastre in vetro antisdrucchiolo ($t=3 \times 10+12=42$ mm).

Fortemente dibattuta è stata spesso la scelta del tipo strutturale, quella di arco fortemente ribassato. Ma il confronto con i precedenti pregevoli ponti del passato, rende la scelta dell'arco quasi obbligata, adatta a inserirsi nel contesto, senza essere ridondante o eccessiva, confacente, al contempo, alle richieste di garantire un adeguato franco libero per la navigazione. Il forte ribassamento scelto, che ha portato a interrogarsi circa l'effettivo funzionamento del ponte (arco o trave), valutandone il prevalente regime estensionale o flessionale, trova tra l'altro giustificazione in un crescendo di luci registrato a Venezia negli ultimi quattro secoli, dai 40 m del ponte degli Scalzi, ai quasi 100 m del ponte della Costituzione. In termini di ribassamento, valutabile dal rapporto f/L , si assiste, infatti, al passaggio dal 22% del ponte di Rialto (1588) in muratura su una luce di 40 m, all'11% del ponte dell'Accademia (1932) in legno e metallo con luce di 48 m, per seguire, con rapporto f/L

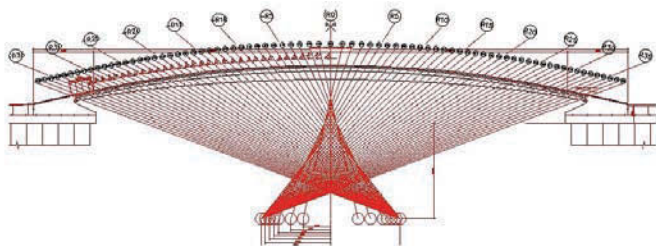
del 7%, del ponte degli Scalzi (1934), in muratura con luce di 40 m, fino ad arrivare agli oltre 81 m coperti dal ponte della Costituzione (2008), che con freccia di soli 4.5 m, registra un rapporto f/L del 5%. Non derivante, quindi, da meri capricci scultorei, la forma scelta risponde, tra l'altro, a chiare esigenze funzionali, ovvero mantenere il più lievi possibili le pendenze, consentendo un agevole attraversamento della passerella. Questa soluzione, consonante con il passato e tecnicamente più efficace, si caratterizza, come prevedibile, con ingenti spinte orizzontali rispetto alle quali l'assorbimento attraverso una catena non era ipotizzabile, per consentire il passaggio dei mezzi natanti, e in considerazione della scarsa resistenza del sottosuolo veneziano. Si giustifica, in tal modo, il tipo di fondazione impiegata, ovvero i relativi costi di realizzazione (rientranti nel consueto 30% della spesa complessiva), soluzione che ha, tra l'altro, rivelato un pregevole rendimento prestazionale, facendo registrare cedimenti dell'ordine di soli 5 mm, a fronte dei 50 mm ipotizzati in fase progettuale. In virtù dell'esiguo

rapporto f/L è stato più volte addebitato al ponte di avere un comportamento strutturale più consono a quello di una trave che a quello di un arco, collocandosi difatti, col suo ribassamento, su valori marginali per l'attivazione di un meccanismo ad arco. Nonostante la sua caratterizzazione geometrica il ponte della Costituzione rivela, in realtà, un comportamento attinente alla sua tipologia, arco fortemente ribassato, con un funzionamento, sia in termini di spinte che di deformazioni, aderente a quello ottenibile con l'applicazione delle formule della scienza delle costruzioni (figura 36). Il ponte, a campata unica, ha forma arcuata, con raggio di 180 m. La sezione strutturale trasversale ha una configurazione variabile non linearmente lungo l'asse del ponte, con un ingombro che va dai circa (170 cm x 64 cm) agli appoggi, ai (2,10 m x 0,90 m). Le travi, oltre a collegare gli archi superiori e inferiori, sono disposte in modo tale da garantire una certa trasparenza che rende la struttura leggera e non invasiva. È possibile, nello specifico, individuare 5 correnti (in rosso in figura) collegati fra loro

da 4 travi orizzontali (1 e 2) e diagonali (3 e 4). Per una modellazione agli elementi finiti che consenta di comprendere l'effettivo funzionamento del ponte, basandosi su una schematizzazione che sia quanto più aderente alla realtà, già di per sé complessa data la geometria del ponte, si individuano (figura 37):

- A-A' (archi superiori): sezione scatolare di forma triangolare con dimensioni variabili;
- B (arco centrale): sezione composta da tre piastre saldate su un tubolare con diametro esterno di circa 400 mm;
- CC' (archi inferiori): sezione tubolare;
- 1-2 (mensole): travi superiori di forma scatolare rettangolare a spessore e dimensioni variabili;
- 3-4 (gambe): travi inferiori di forma scatolare rettangolare a spessore e dimensioni variabili.

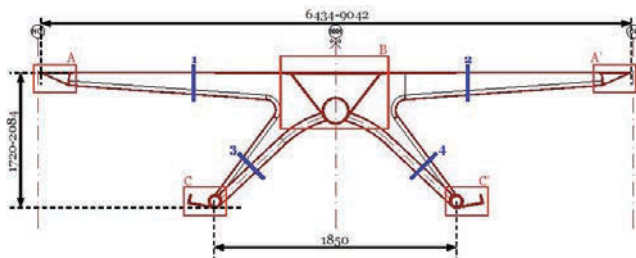
La struttura è stata quindi discretizzata, utilizzando il software SAP2000, con elementi di tipo *frame*, tutti privi di rilasci alle estremità. Sono stati applicati, alle travi trasversali, degli *end offset* (estremità rigide) laddove queste



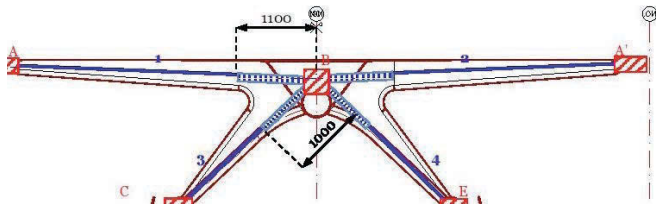
36. Ponte della Costituzione, disposizione radiale delle travi di collegamento

incontrano l'arco B, per meglio modellare il collegamento complesso che avviene proprio in corrispondenza del nodo centrale (figure 38 e 39). Una stima preliminare dei carichi agenti sul ponte ha portato a valutare un rapporto fissi/accidentali approssimabile all'unità. In particolare, assumendo una superficie fruibile di circa 624 m^2 ($b_{\text{media}} = 7.62 \text{ m}$), a valle dei 3600 kN conteggiati quale peso delle strutture in acciaio, si valuta un carico permanente strutturale, g_1 , di 580 kg/m^2 (validato da un analogo risultato del software

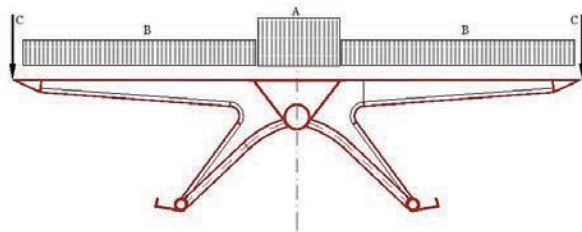
di calcolo). Per i carichi permanenti non strutturali, g_2 , si è fatto riferimento ai materiali effettivamente presenti: assegnandoli, nel modello FEM, a ciascuna asta trasversale in funzione della rispettiva area d'influenza, si stima per la pavimentazione in pietra d'Istria posta in opera su soletta in calcestruzzo (A) un carico di $4,72 \text{ kN/m}^2$; per le lastre in vetro con annessa struttura metallica di supporto (B) 250 kg/m^2 , mentre per le balaustre con elementi in ottone si assume un carico di 250 kg/m . In quanto al carico accidentale, i consueti 500 kg/m^2 previsti nel caso di ponti pedonali dalla NTC'08 (§5.1.3.3.3, Schema di Carico 5, folla compatta), sono stati incrementati del 20% (600 kg/m^2), come previsto dalle relazioni di calcolo e di collaudo, in virtù dell'elevato numero dei turisti che frequentano Venezia. Dalla modellazione agli elementi finiti per condizioni di carico simmetrica, comprensiva dei permanenti strutturali e non quindi dei carichi accidentali, si deduce un comportamento simile a quello di un arco a due cerniere, di forma parabolica. A tal proposito, a verifica degli output forniti



37. Ponte della Costituzione, sezione trasversale tipo



39. Ponte della Costituzione, modellazione FEM, distribuzione carichi DEAD e LIVE sezione trasversale



38. Ponte della Costituzione: Modellazione FEM, discretizzazione degli archi e delle travi

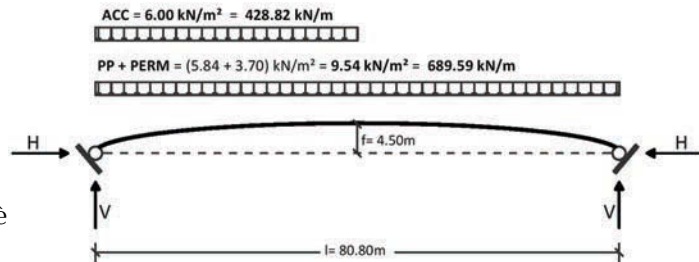
dal software di calcolo, si propone un calcolo analitico delle sollecitazioni indotte sulla struttura da siffatta condizione di carico, stimando l'entità della spinta mediante formule semplificate fornite dalla letteratura specifica. In particolare si fa riferimento allo schema di arco parabolico a due cerniere soggetto a carichi distribuiti simmetrici (q) sia trasversalmente che longitudinalmente, con asse coincidente con la funicolare dei carichi; in tal caso si valuta una spinta di entità pari a:

$$H^{(*)} = \frac{ql^2}{8f} \frac{1}{(1+\nu)} \quad \text{in cui} \quad \nu = \frac{15}{8} \frac{I_y}{f^2 Ac}$$

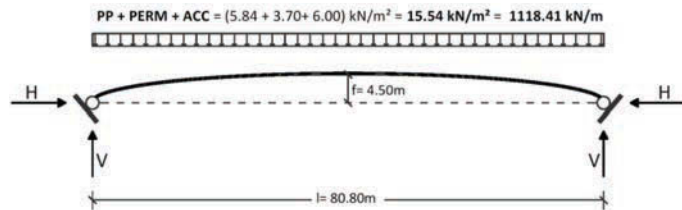
L. Santarella, *Prontuario per il calcolo del cemento armato*, (1972), p. 688

Il parametro ν tiene conto della deformazione da sforzo normale; in esso compaiono: Ac , l'area della sezione in chiave, I_y , momento di inerzia della sezione in chiave (circa 0.07 m^4), f , freccia dell'arco. Nel caso in esame si è valutato $\nu = 0.0655$ (figura 40).

Analiticamente è stato determinato un valore della spinta $H = 20.093 \text{ kN}$, a fronte di $HFEM = 20.166 \text{ kN}$ restituita dal programma di calcolo: la rispondenza tra il valore ottenuto con formule semplificate e quello fornito dal modello agli elementi finiti del ponte (con un divario di solo 0.36%), conferma le precedenti ipotesi circa il comportamento della struttura. Nello specifico, trascurando le sezioni degli archi inferiori e superiori, è quello centrale a operare *in primis* da elemento portante, registrando un funzionamento comparabile con quello di un arco parabolico a due cerniere (figura 41). Il rapporto tra i regimi



40. Ponte della Costituzione, modello semplificato, arco parabolico a due cerniere con carico simmetrico (FULL)



41. Ponte della Costituzione, modello semplificato, arco parabolico a due cerniere con carico asimmetrico (ASYMMETRIC)

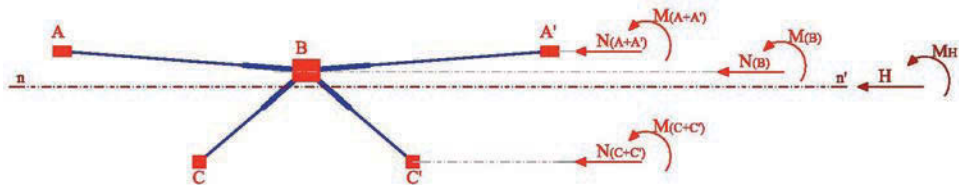
estensionale e flessionale è, nello specifico, deducibile alla distribuzione in termini di momento flettente e di sforzo normale registrabili in chiave all'arco.

Considerando le sollecitazioni flettenti, si è portati a valutare l'equilibrio tra i momenti agenti, differenziando momento esterno, momento interno, somma di quelli valutati negli archi e dei momenti indotti dagli sforzi assiali per le rispettive distanze dall'asse neutro, quindi momento da spinta (figure 42 e 43).

Dalle analisi condotte si evince come l'equilibrio del momento esterno da carichi verticali venga garantito dalla spinta e in parte minore, quasi trascurabile, dai momenti negli archi e dai momenti prodotti dalle eccentricità degli sforzi assiali rispetto al baricentro degli stessi. Per entrambe le condizioni di carico valutate (simmetrica e non), ben oltre il 90% del momento flettente agente è, difatti, assorbito attraverso un regime di *spinta*. Circa il 7% viene contrastato dai momenti interni, prodotti dall'eccentricità delle spinte degli archi superiori e inferiori rispetto

al baricentro della sezione trasversale. Sebbene la fitta scansione di elementi trasversali, unita all'evidente centrifugazione delle aree che si evince dallo studio della sezione trasversale, inducano a ipotizzare che la struttura possa seguire un regime prevalentemente flessionale, dalle analisi si evince che solo l'1% del momento agente è assorbito in flessione, anche per carichi non simmetrici, confermando la bontà della progettazione.

Con il suo forte ribassamento, il ponte della Costituzione permette l'utilizzo di un piano di camminamento coincidente con quello della struttura portante, esulando dall'impiego di qualsivoglia elemento di riempimento. Il ridotto interesse tra gli elementi trasversali, unito alla forma dell'arco in grado di garantire un regime estensionale interno anche in risposta a carichi non simmetrici, consente, dunque, di realizzare una struttura assolutamente originale, che non necessita di alcun elemento trave, di irrigidimento, o di ripartizione dei carichi, ovvero necessario alla definizione del consueto piano



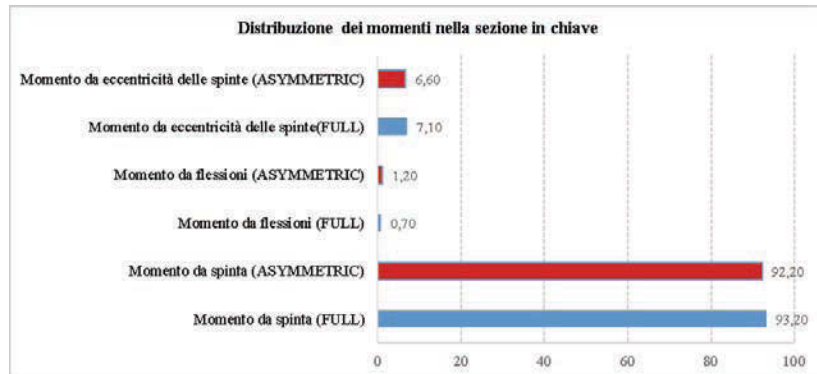
42. Ponte della Costituzione, distribuzione dei momenti nella sezione in chiave

orizzontale percorribile dagli utenti. L'esiguo interasse tra elementi trasversali adottato ($ip/L = 1\%$) dà, al contempo, la possibilità di assumere come portanti elementi solitamente considerati terziari, usualmente adottati quali finiture: eleganti lastre in vetro, donando grande leggerezza alla struttura costituiscono l'effettivo impalcato del ponte (figure 44 e 45).

L'apporto di Calatrava va, sicuramente, ben oltre la sua abilità di ricreare forme del tutto originali, di chiara ispirazione naturalistica. Annichilendo quel rapporto arco-trave, tipico dei ponti ad arco, in particolare di quelli

a via superiore, in tale struttura riesce a evitare finanche l'impiego di elementi (secondari) di trasferimento. Ampia padronanza del comportamento strutturale traspare in questa, come in altre opere di Calatrava; palesandone una così piena consapevolezza il progettista ha spesso, proprio come nel caso del ponte della Costituzione, lanciato sfide e continue provocazioni al panorama mondiale dell'ingegneria, proponendo ardite soluzioni che, disvelando l'effettivo percorso delle forze, lasciano stupefatti gli osservatori. Divenuto *status symbol* della città, col suo costo complessivo di

43. Ponte della Costituzione, distribuzione dei momenti nella sezione in chiave, istogramma



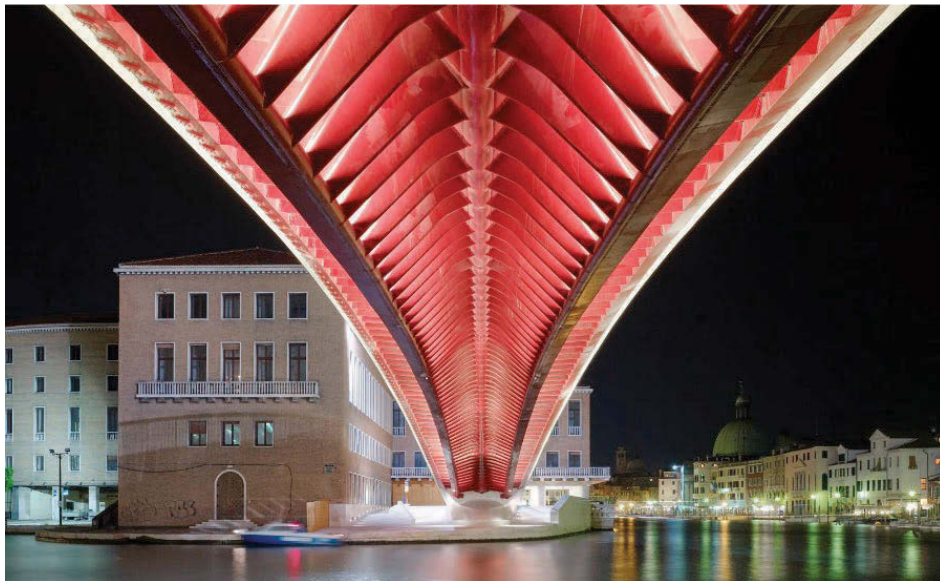
6.609.000 euro, a valle delle cinque varianti, il quarto ponte sul Canal Grande è ispirato dalla necessità di consegnare alla città qualcosa di non ordinario, proprio come è stato per Londra il Millennium Bridge, costato, però, ben 18 milioni di sterline (pari a circa tre volte il costo relativo del ponte lagunare): chiuso subito dopo l'inaugurazione, si rese necessario per il ponte londinese

un tempestivo intervento di adeguamento, con una spesa aggiuntiva di ben cinque milioni di sterline.

Nel caso specifico del ponte della Costituzione, polemiche infondate hanno riguardato i costi di realizzazione; in tal caso, la voce maggiormente imputabile di un eccesso potrebbe sembrare, a un occhio poco avvezzo e superficiale, quella inerente le strutture in acciaio,

essendo presenti per 500 tonnellate, con un costo (basso) al chilo di circa 4 euro, consona, in realtà, a un tipo di struttura ordinaria, seppure sia elevata l'incidenza delle strutture in acciaio, con un peso di 580 kg/m^2 .

Il ponte della Costituzione porta a sottacere critiche e atteggiamenti avversi qualora si valuti la spesa complessivamente affrontata in relazione all'utilizzazione dell'opera, ovvero al valore aggiunto acquisito dallo spazio circostante: registrando un transito giornaliero di 15-20mila persone, il ponte adempie appieno a una funzione tanto importante per la città. Va anche detto che il costo a



44. Ponte della Costituzione, impalcato, vista dal basso



45. Ponte della Costituzione, impalcato, vista laterale

metro quadro dell'opera, qualora si consideri il totale delle superfici di riqualificazione urbana progettate da Calatrava nelle piazzole di accesso al ponte, diventa assolutamente ragionevole rimanendo inferiore a 3000 euro/mq.

Confacenti all'opera risultano, al contempo, i tanto contestati tempi di realizzazione, protrattisi oltre le iniziali previsioni. Risulta all'uopo opportuno citare un celebre esempio, per certi versi similare, qual è l'Opera House di Sidney, realizzato su progetto, vincitore di un concorso internazionale, dell'architetto danese Utzon. La straordinarietà dell'opera, anche in tal caso, giustifica il protrarsi della chiusura

dei lavori: sebbene, in fase progettuale, si auspicasse di ultimare i lavori entro quattro anni (1959-63), furono, in realtà, necessari, ben 14 anni per realizzare il progetto di Utzon, facendo registrare un incremento di 1.475% rispetto ai costi inizialmente previsti.

Se l'originalità della forma, e l'oculata ricerca che la sottende, sono divenute il *Leitmotiv* del moderno fare architettura, l'obiettivo dell'odierna progettazione strutturale, influenzata da un frenetico scenario in cui ciò che conta è il primo impatto (Rem Koolhaas, *Delirious New York*, 1978), è pur vero che le inusuali soluzioni adottate comportano, a scapito dei costi complessivi di realizzazione, pesi strutturali fuori dall'ordinario.

Completamente opposto è quindi l'approccio dei moderni progettisti, rispetto al *modus operandi* dei padri dell'ingegneria ottocentesca, primo tra tutti Navier, sostenitore della concreta necessità di trovare soluzioni fattibili, non solo strutturalmente, ma anche in termini di costi: *Les ingénieurs, en préparant les projets [...] Parmi*

ces conditions, l'une des plus essentielles est l'économie; la solidité et la durée ne sont pas moins importantes. [...] l'art consiste principalement à juger jusqu'à quel point il est permis de s'en approcher (Navier, *Resumé des Leçons*, 1833).

A rimarcare le moderne tendenze, in cui la volontà di stupire porta a trascurare l'economicità delle soluzioni, con pesi strutturali sempre crescenti, si riportano alcuni esempi: Il Bird Nest di Herzog & De Meuron (Pechino, 2009) per la cui forma scultorea sono stati impiegati ben 400 kg/m² di acciaio; il CCTV di Koolhaas e Balmond (2008), le cui strutture metalliche ammontano a circa 300 kg/m², ben distante dai valori tipici delle costruzioni per uffici di altezza paragonabile; ancor prima, lo Stadio Olimpico di Atene (2004), su progetto di Calatrava, nel cui caso si stima un peso dell'acciaio strutturale di 500 kg/m² (vedi A. De Luca, in *Elio Giangreco, l'uomo, l'ingegnere, il maestro*, Mazzolani, a cura di, 2011).

La tendenza del progettista a *vertebrizzare*, chiaramente espressa dal progressivo decremento dell'indice ip/L,

gli ha consentito di operare, in regime estensionale, su grandi come su piccole luci, sfidando le più affermate consuetudini strutturali, e nell'ambito di ponti ad arco a via inferiore e nel caso di strutture ad arco puro, fino alla più avveniristica tipologia strallata. Pioniere di un nuovo approccio progettuale, pienamente confacente con le tendenze dell'attuale *star system*, Calatrava, proprio come Amman agli inizi del secolo scorso, assurge a *padre* di quella metodologia che ha permesso oggi di raggiungere luci record con strutture estremamente snelle.

Nel panorama mondiale, senza dubbio non irrisorio è il contributo di Calatrava: per opere, come quelle descritte, che sembrano, talvolta, voler denunciare una certa precarietà della struttura, l'equilibrio è garantito da una complessa collaborazione di sistemi statici, oltre che dalla presenza di stati di pre-sollecitazione tali da consentire una libertà nelle forme, prima inimmaginabile, che garantisca il perfetto inserimento nel contesto. È questo il caso del Light Rail Train Bridge di

Gerusalemme (2005-08) (figura 46) ponte strallato con pilone alto 118 metri, divenuto simbolo della città. Da quanto finora detto, è oltremodo ragionevole tratteggiare il profilo di Calatrava come quello di un grande innovatore, di un genio che, a valle di un'intensa attività di studio e di ricerca nel campo dei ponti che lo ha visto protagonista negli ultimi trent'anni, ha appurato una metodologia progettuale in cui, grazie all'infittimento delle sezioni trasversali, è riuscito a rendere realizzabile uno schema strutturale privo di travata irrigidente.

A nostro avviso è proprio questa ricerca, sviluppata e perseguita negli anni con caparbia da Calatrava, che ha consentito ad altri di raggiungere traguardi prima assolutamente impensabili, nel campo dei ponti strallati (L.G. Guidi, *L'evoluzione progettuale dei ponti strallati*, tesi 2014) dove nel caso del ponte Russky (2012) (figura 47) si è superato il chilometro ($l = 1180$ m) proprio grazie all'infittimento delle sezioni trasver-



46. Santiago Calatrava, ponte di Gerusalemme, 2008

sali che, come propugnato da Calatrava, ha consentito di raggiungere snellezze prima impensabili. Sottolineando, in conclusione, l'unicità del ponte della Costituzione, opera in grado di coniugare alla modernità delle soluzioni tecnologiche la tradizione



47. SIC Mostovik, ponte Russky, 2012

delle forme, consonante con quella venezianità intrisa di storia e d'arte, si ritiene doveroso ringraziare, oltre all'amico Enzo Siviero, l'ing. Salvatore Vento, grazie alla cui dedizione di uomo dello Stato, è oggi possibile avere a Venezia un'opera di siffatta straordinarietà.

Bibliografia

1. Leon Battista Alberti, *I Dieci Libri De L'Architettura*, 1546
2. A. Palladio, *I Quattro Libri dell'Architettura*, Venezia, 1570
3. H. Gautier, *Traité de ponts, ou il est parlé de ceux des Romains & de ceux des modernes*, 1716
4. "Construire des ponts au XVIIIe siècle", *L'oeuvre de M. Perronet*, 1782
5. O. Bertotti Scamozzi, *Le Fabbriche e i Disegni di Andrea Palladio*, Vicenza, 1796
6. N. Cavalieri, *Istituzioni di architettura statica e idraulica*, 1831
7. M. Gauthey, *Traité de la construction des ponts*, 1832
8. Tveit P., *An Introduction to the Network Arch*, Technical University of Norway, Trondheim, 1956
9. E. Miozzi, *Venezia nei secoli*, Voll. 1 & 2, Libeccio, Venezia 1957.
10. Timoshenko & Gere, *Theory of Elastic Stability*, McGraw Hill, New York 1961
11. G. Krall, *Stabilità e vibrazioni*, Cremonese, Roma, 1968.
12. E. Miozzi, *Dal ponte di Rialto al nuovo ponte degli Scalzi*, Stabilimento tipografico del Genio Civile, Roma 1935.
13. E. Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Sansoni, Firenze 1981.
14. F. Leonhard, *Bridges: Aesthetics and Design*, The Architectural Press, London 1982.
15. Rizzo T., *I Ponti di Venezia*, Newton Compton, 1983.
16. G. Grattesat & A. Arsac, *Ponts de France*, Presses de l'École National des Ponts et Chaussées, Paris 1984.
17. G. Ballio, «Il Ponte dell'Accademia a Venezia», Convegno e mostra: *1889-1989 Centenario del Viadotto sull'Adda*, Milano 1989, *Costruzioni Metalliche*, n.1, 1990.
18. H. Bachmann, W.J. Ammann, F. Deischl, J. Eisenmann, I. Floegl, G.H. Hirsch, G.K. Klein, G.J. Lande, O. Mahrenholtz, H.G. Natke, H. Nussbaumer, A.J. Pretlove, J.H. Rainer, E. Saemann, L. Steinbeisser, *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*, Springer Science & Business Media, 1995.
19. K. Frampton, Webster C., Tischhauser A., *Calatrava Bridges*, Birkhauser, Berlin 1996.
20. M.P. Petrangeli, *Progettazione e Costruzione di Ponti*, Ambrosiana, Roma 1996.
21. C. Menn, "The Place of Aesthetics in Bridge Design", *Structural Engineering International*, Vol. 6, No. 2, pp. 93-95, 1996.
22. V. Nascè, D. Sabia, "Teoria e pratica nella costruzione nei ponti in muratura tra XVIII e XIX secolo", in *Carlo Bernardo Mosca, 1792-1867: un ingegnere architetto tra Illuminismo e Restaurazione*, V. Comoli, L. Guardamagna, M. Viglino (a cura di), Guerini, Milano, pp. 29-38.
23. C. Menn, "Functional Shaping of Piers and Pylons", *Structural Engineering International*, Vol. 8, No. 4, pp. 249-251, 1998.

24. A. Sinopoli, "Arch Bridges. History, analysis, assessment, maintenance and repair", *Proceedings of the second International Arch Bridge Conference*, Venice, 1998. Extract: "The relationship between the Gothic model and the conception of bridges", by A. Coste, School of Architecture, Saint Etienne, France.
25. W. Chen, Duan L., *Bridge Engineering Handbook*, CRC Press, 2000.
26. F. Foce, D. Aita, "The masonry arch between limit and elastic analysis. A critical reexamination of Durand-Claye's method", *Proceedings of the First International Congress on Construction History*, Madrid, 2003, S. Huerta (a cura di), Madrid: I. Juan de Herrera, SEDHC, ETSAM, A.E. Benvenuto, COAM, F. Dragados, 2003.
27. C. Menn, *Stahlbetonbrücken (Reinforced concrete bridges)*, 2003.
28. L.F. Troyano, *Bridge Engineering, A global perspective*, 2003.
29. R.W. Cluogh, J. Penzien, *Dynamic of structures*, 2003.
30. F. Mazzolani, "Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas", *Proceedings of STESSA Conference*, Napoli 2003.
31. A. Barbieri, V. Chiaradia, A. Di Tommaso, "Railway masonry arch bridges of Venice lagoon: history, technology and structural behavior", CIMNE, Barcelona 2004.
32. M. Arioli, "The Art of Structural Design: a Swiss Legacy", *Eine Ausstellung im Zürcher haus konstruktiv*, ETH Zürich, www.library.ethz.ch, 2005.
33. F. Hauksson, *Dynamic behaviour of foot-bridges subjected to pedestrian-induced vibrations*, Master dissertation, Lund University, 2005.
34. T.B. Shabanovitz, *The Progressive Synthesis of Architecture and Engineering in Modern Bridge Design*, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
35. W.J. Watson, *Great Bridges. Form Ancient time to the Twentieth Century*, 2006.
36. M. Mazzoleni, L. Jurina, "Ponti in muratura: difetti e patologie", *Atti convegno CIAS Ponti e viadotti: ispezioni visive e tecniche di risanamento*, Bolzano 2006.
37. P. Cross-Rudkin, "Centres for Large Span Masonry Arch Bridges in Britain to 1833", *Proceedings Second International Congress on Construction History*, Cambridge 2006.
38. F. Zezza, "Geologia, proprietà e deformazione dei terreni del centro storico di Venezia", *Atti Second Convention La riqualificazione delle città e dei territori*, Venice 2007.
39. B. Eckhardt, E. Ott, S. Strogatz, D. Abrams, A. McRobie, "Modelling walker synchronization on the Millennium Bridge", *Physical Review*.
40. S. Dobricic, E. Siviero, *De pontibus. Un manuale per la costruzione dei ponti*, Il Sole 24 Ore, Milano 2008.
41. V. Theodore V. Galambos, A.E. Surovek. *Structural stability of Steel: concepts and applications for structural engineers*, J. Wiley & Sons, 2008
42. E. Brühwiler, "C. Menn's recent bridge designs. Reducing structural elements to the simplest solution", *5th New York City Bridge Conference*, 2009.

43. D. Proske, P. van Gelder, *Safety of Historical Stone Arch Bridges*, Springer, 2009.
44. L. Bruno, F. Venuti, "Crowd-structure, interaction in footbridges: modelling, application to a real case-study and sensitivity analyses", *J. Sound Vib.* 323, 2009, pp. 475-493.
45. M. De Miranda, U. Barbisan, M. Pogacnick, L. Skansi, "Bridges in Venice, Architectural and Structural engineering aspects", *Proceedings 34th IABSE Symposium*, Venezia 2010.
46. T.V. Galambos, *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, J. Wiley & Sons, 2010.
47. F. Trovò, *I sistemi fondali dell'architettura storica di Venezia, Caratteri Costruttivi dell'Edilizia Storica*, Luav, Venezia 2010.
48. K.R. Heath, "A critical analysis of Ponte della Costituzione", *Proceedings of the Bridge Engineering Conference*, Venice 2011.
49. Arcomai Snc, P. Sfamen, D. Busato, *Restau-ro del Ponte di Rialto a Venezia. Relazione Tecnica*, Direzione Progettazione ed esecuzione lavori, Comune di Venezia 2013.
50. M. Como, *Static of Historic Masonry Construction*, Springer 2013.
51. L.G. Guidi, "L'evoluzione progettuale dei ponti strallati. Cable-stayed bridges: Aesthetic and Design (L'equilibrio tra ingegneria e architettura del progetto di ponti)", tesi di laurea, relatore A. De Luca, 2014.
52. E. Alessandrelli, "Distorsioni sistematiche, i ponti truccati di Eugenio Miozzi", *SIXXI 3, Storia dell'ingegneria strutturale in Italia*, Gangemi, Roma 2015.
53. D. Aita, O. Pedemonte, K. Williams, *Masonry Structures: Between Mechanics and Architecture*, Birkhäuser, 2015.
54. Y. Fujino, D.M. Siringoringo, *A Conceptual Review of Pedestrian-Induced Lateral Vibration and Crowd Synchronization Problem on Footbridges*, ASCE, 2015.

Web references

1. International Database and Gallery of Structures, <http://en.structurae.de>
2. http://www2.comune.venezia.it/lidoliberty/biografie/miozzi_e.htm
3. http://mediateca.palladiomuseum.org/palladio/opera_immagini.php?id=73&TSK=L&TR=14&RN=0
4. <http://fysvenice.weebly.com/rialto-bridge.html>

